

ATOMERŐMŰVEK AZ ALAPKUTATÁS SZOLGÁLATÁBAN

Pázsit Imre
Chalmers Műszaki Egyetem
Göteborg, Svédország

Az atomerőművek mérnöki-technológiai berendezések, amelyek elsődleges célja az energiatermelés, tehát úgy tűnne, hogy nincs közük az alaptudományokhoz. Azonban, ahogy erre a 2015-ös Nobel-díj is emlékeztetett, legalábbis egy területen nélkülözhetetlen szolgálatot tettek a természet titkainak feltárásában. Ez a terület a neutrínofizika, és speciálisan a neutrínók nullától eltérő nyugalmi tömegének bizonyítása.

Ahogy a *Fizikai Szemle* 2015. decemberi számában közölt cikkében [1] *Király Péter* leírta, már a neutrínók kísérleti kimutatása is a Savannah River atomreaktorokból származó neutrínófluxus detektálásával történt, amelyet *Frederick Reines* és *Clyde E. Cowan* végzett el 1956-ban. Fent említett cikk szemléletesen és élvezetesen leírja a neutrínók nem-nulla nyugalmi tömegével kapcsolatos elméleti fejtegetéseket és a kísérleti bizonyítékokat, amelyekben így nekünk itt nem kell elmélyednünk. A cikk azt is leírja, hogy a Szuper-Kamiokande és a Sudbury Neutrino Observatory (SNO) mérések, irányérzékeny neutrínódetektorok segítségével, egyrészt a kozmikus sugárzás által keltett müon-neutrínók¹ eltűnését (tau-neutrínóvá való oszcillációját) mutatta ki (Szuper-Kamiokande), másrészt a Naphól jövő elektron-neutrínók müon- és tau-neutrínókká történő átalakulását bizonyította (SNO mérések).

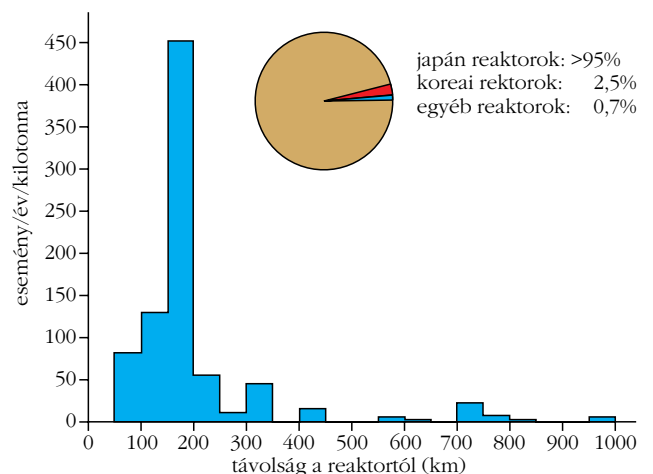
Ezzel a történetnek, jobban mondva a különböző lehetséges neutrínóoszcillációk kimutatását célzó kutatásnak azonban még nincs vége, amiről jelen cikk írójának is vannak – legalábbis közvetett – élményei a benne résztvevő kutatókkal való kapcsolatain keresztül. A kapcsolat oka pedig az, hogy ezen mérésekben atomreaktorokból származó neutrínókat használtak.

A fent említett Szuper-Kamiokande mérésben, amely a müon-neutrínók eltűnését mutatta ki (hiszen a detektor nem volt érzékeny a tau-neutrínókra, amelyekbe a müon-neutrínók „átoszcilláltak”), a detektor felett a légkörben keltett müon- és elektron-neutrínók arányát hasonlították össze a Föld áttelens oldalán keltett, és onnan a detektorba a földgömbön keresztül átjutott neutrínók ugyanazon arányával. Ahhoz, hogy a két adat közötti eltérést kísérletileg ki

lehesen mutatni, a földátmérőnyi távolság megfelelőnek bizonyult.

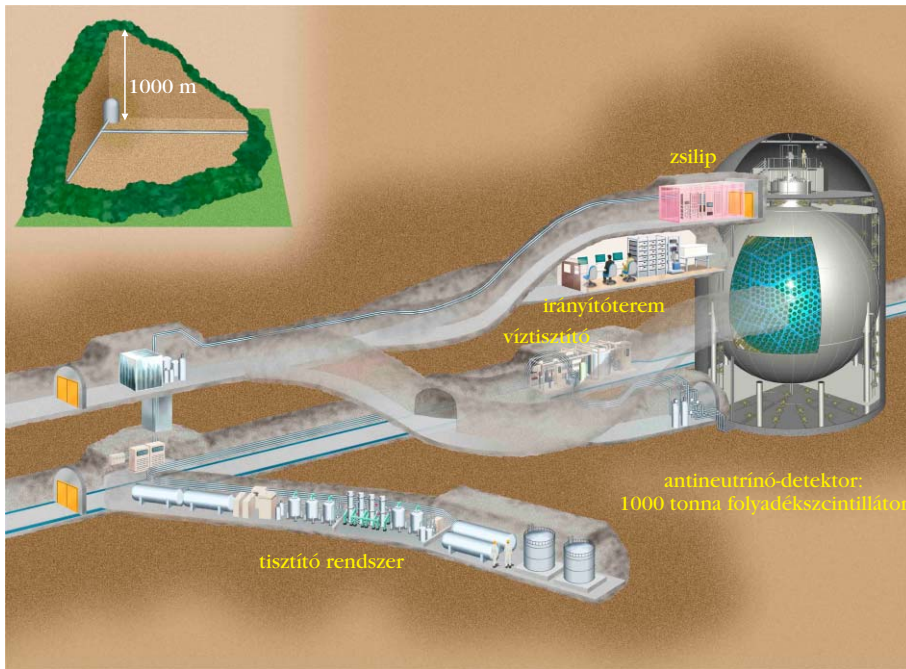
Azonban ahhoz, hogy egy hasonló méréssel az elektron-neutrínók „eltűnését” lehesen kimutatni egyrészt egy „tisza” elektron-neutrínó-forrásra (a kozmikus sugárzás által keltett müon- / elektron-neutrínó

1. ábra. Fölül a Szuper-Kamiokande kísérlet helyszíne Japán fő szigetén (Honsun). Az áttetsző gyűrűn belüli sávban 26, nagy teljesítményű atomerőmű található. Az alsó ábra a KamLAND-ban a reaktorokból jövő átlagosan várható neutrínóesemény-gyakoriságot mutatja, egy évre 1000 tonna detektortömegre normalizálva, a detektortól való távolság függvényében. A kördiagramban a szóba jöhető atomerőművi neutrínóforrások eloszlása látható.



Pázsit Imre az ELTE-n szerzett fizikus oklevelet 1971-ben, majd ugyanitt doktorált 1975-ben. 1985-ben szerezte meg a Fizikai Tudomány Doktora fokozatot. 1991-től a göteborgi (Svédország) Chalmers Műszaki Egyetem Nukleáris Technikai (korábbi nevén Reaktorfizikai) Tanszékének professzora. Kutatási területe a reaktordinamika, a neutronzaj- és a reaktorzaj-diagnosztika, valamint a részecsketranszport-folyamatok. Több mint 200 tudományos publikáció szerzője.

¹ Pontosabban antineutrínók, de az egyszerűség kedvéért a továbbiakban csak neutrínóként hivatkozunk az antineutrínókra is.



2. ábra. A KamLAND detektor elhelyezkedésének vázlata.

arány 2:1), másrészt a forrás és a detektor között jóval rövidebb távolságra van szükség.

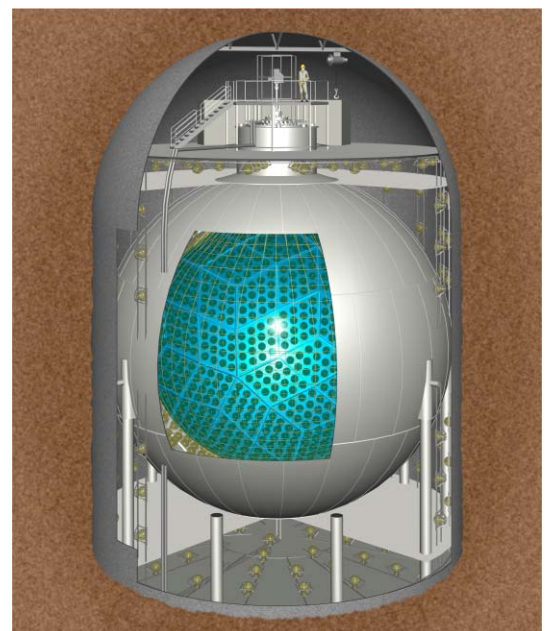
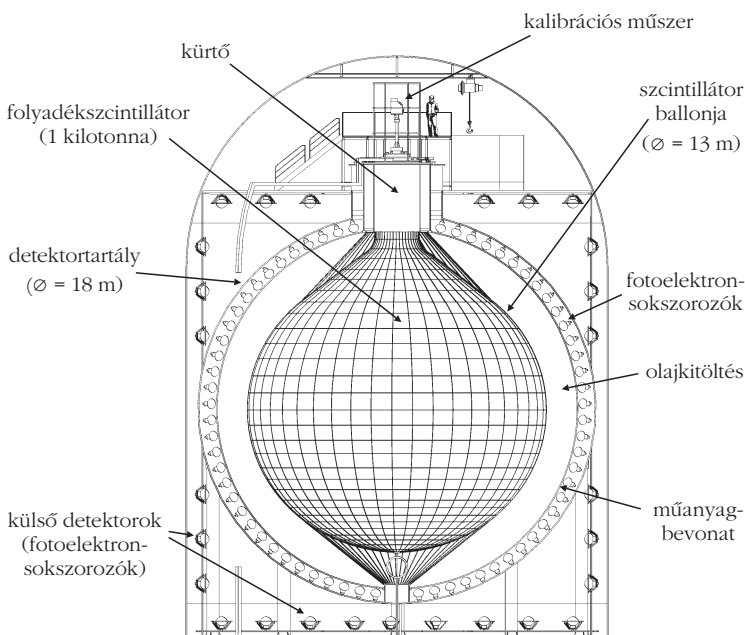
Ez az a pont, ahol az atomreaktorok, mint erős elektron-neutrínó-források, valamint a Szuper-Kamiokande szerencsés elhelyezése szerepet kapott. Az atomerőművekben keletkező intenzív neutrínófluxus alkalmas mind az elektron-müon-neutrínó-, mind az elektron-ta-neutrínó-oszcillációk vizsgálatára. (Itt közvetlenül megjegyezzük, hogy safeguard-alkalmazások állnak kifejlesztés alatt arra, hogy az atomreaktorokból származó neutrínófluxust a reaktorok üzemeltetésének távolból való monitorozására lehessen használni, főleg „nem deklarált” üzemeltetés ese-

Kasiwazaki erőmű. (A mérések még jóval a fukusimai baleset előtt készültek, amikor a reaktorok még működtek).

Ezekhez az újabb, reaktorneutrínók detektálását célzó mérésekhez a korábbi Kamioka detektor helyére új detektort telepítettek, amit KamLAND-nak neveztek el (Kamioka Liquid Scintillator AntiNeutrino Detector, 2. ábra). A KamLAND detektor 1000 tonna folyékony szcintillációs detektort tartalmaz (3. ábra). Ezzel a detektorral sikerült először kimutatni az elektron- és a müon-neutrínók közötti oszcillációt. Az ezen mérések eredményét közlő cikk, amelyet a kísérleteket vezető *Atsuto Suzuki*, a szendai-i Tohoku Egye-

tén olyan országokban, amelyek nem ratifikálták a nemzetközi atomsorompó-egyezményeket). Az 50 000 tonnányi vizet tartalmazó, Cserenkov-sugárzást detektáló Szuper-Kamiokande detektor, amely ugyanúgy, mint kisebb elődje, a Kamiokande detektor, egy Kamioka nevű falu melletti cinkbányában épült ezer méter mélyen. Kamioka a négy fő japán szigetből a központi Honsu sziget közepén fekszik. Ahogy az 1. ábra mutatja, a detektor körülbelül 140–180 kilométeres távolságot lefedő gyűrűben 26 atomreaktor található (az összes japán reaktor fele), közöttük a legnagyobb japán atomerőmű-telephely, a – kis betétábrán is mutatott – hét reaktorblokkal működő –

3. ábra. A KamLAND detektor.



tem professzora és csoportja publikált a *Physical Review Letters*-ben [2], 2004 folyamán a legtöbbet hivatkozott cikk lett (4. ábra). Az a tény, hogy ezen mérésekben az atomreaktoroknak is szerep jutott, már a cikk címében szerepel: *First results from KamLAND: Evidence for reactor antineutrino disappearance* (A KamLAND első eredményei: bizonyíték a reaktor-antineutrínók eltűnésére).

Itt érdemes megjegyezni, hogy a kísérletek értelmezéséhez természetesen megfelelő pontossággal kellett ismerni a várható neutrínóhozamot. Ez nem triviális feladat. Elsősorban folyamatosan, naprakészen ismereni kell, hogy a reaktorok mekkora teljesítményen üzemelnek, amely adat nyilvánosan hozzáférhető. De ez egymagában messze nem elégséges. A neutrínóhozam a reaktorban az üzemelés alatt felhalmozódott hasadási termékek és transzurán elemek mennyiségétől is függ. Ezek már nemcsak hogy nem nyilvánosak, hanem csak speciális, úgynevezett kiegészítő kódokkal való számításokkal határozhatók meg: a reaktor eredeti üzemanyag-tartalmából, az üzemelési paraméterek (elsősorban a neutronfluxus, vagyis a reaktorteljesítmény) állandó követésével iteratív módon követik a reaktorban levő összes izotóp mennyiségének időbeli alakulását. Ráadásul a rendelkezésre álló kereskedelmi kódok, érthető módon, nem dokumentálják az összes, a neutrínómérésekhez szükséges izotóp mennyiségét. Ezért a szendai-i neutrínófizikus-csoport a TEPCO-val (Tokyo Electric Power Company) együttműködésben, a reaktorfizikusok által jól ismert (történetesen éppen svéd kollégáim által kifejlesztett) CASMO és Simulate-3 kódokra alapozva, kidolgozott egy számítási apparátust, amellyel a Kamiokát érő neutrínófluxust valós időben tudták követni [3]. A KamLAND és TEPCO közötti megállapodás szerint a KamLAND kooperáció minden méréshez megkaphatta a szükséges neutrínófluxus-adatot azzal a megkövetéssel, hogy azokat kizárólag a neutrínó kutatáshoz használhatják. Ez szép példája az ipar és a kutatók közötti együttműködésnek.

A teljesség kedvéért azonban még hátra volt a harmadik típusú oszcilláció, az elektron–tauneutrínó-oszcilláció kísérleti igazolása (vagy ahogy talán a neutrínófizikusok mondanák, a „harmadik keverési fázisszög” megtalálása). Természetesen ezen oszcilláció kimutatásához is reaktor-neutrínókra volt szükség, azonban ehhez a KamLAND körül található reaktorok túlságosan messzire voltak. A kutatók számára világos volt, hogy ehhez a méréshez a forrásnak jóval közelebb kell lennie a detektorhoz. Ezen a ponton a neutrínófizikusok újra a reaktorfizikusokhoz fordultak, jómagam így kerültem a képbe.

A számos (gyakorlatilag évenkénti) japán látogatásom egyikén, 2005-ben történt, hogy a szendai-i Tohoku Egyetem KamLAND-nál dolgozó neutrínófizikusai, illetve maga a vezetőjük, Atsuto Suzuki professzor megkeresett. A megkeresés egy közös ismerősön, a hozzám hasonlóan reaktorfizikus Kojiro Nishinán keresztül történt. K. Nishina (a híres, Klein–Nishina-formulából jól ismert *Yoshio Nishina* fia), akivel azóta



The World's Highest Citation Rate



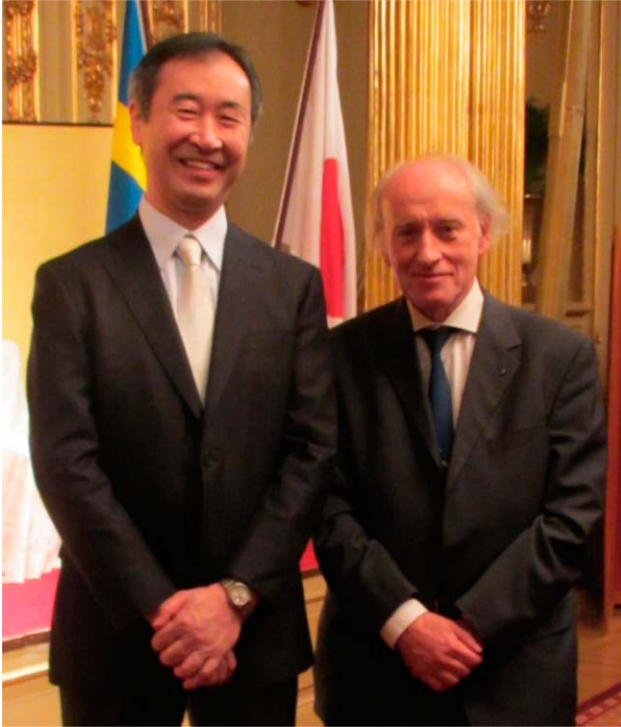
The international research group headed by Prof. Atsuto Suzuki discovered the possibility that a still mysterious particle 'Neutrino' has mass and published a paper entitled "First results from KamLAND: Evidence for reactor antineutrino disappearance" in *the Physical Review Letters*, 17 January 2003. The paper was ranked as the world's best of citations in physics in *the Science Watch*, March/April 2004.

4. ábra. A 2004-ben legtöbbet idézett cikk a fizika területén.

is szoros szakmai és baráti kapcsolatot tartok, volt az első japán utamon a meghívóm és házigazdám a Nagoyai Egyetemen. Atsuto Suzuki professzor, akinek csoportja a második típusú oszcillációkat megtalálta, akkor a Tohoku Egyetem rektorhelyettese volt. Őt akkor az a kérdés foglalkoztatta, hogy miként lehetne egy erős, mozgatható neutrínóforrást találni. A beszélgetés alatt azt kérdezte, hogy speciálisan a neutrínómérésekhez lehet-e mozgatható atomreaktor építeni, amellyel a harmadik típusú oszcillációkat tudnák vizsgálni, illetve kimutatni.

Ötlete az volt, hogy a reaktort a föld alatt kialakított alagútban kellene mozgatni, esetleg függőlegesen, mert a sűrű népességű területeken, mint Japán, a felszíni mozgatás problematikus. Természetesen ez nem volt egy könnyen megválaszolható kérdés. Abban az időben a mostanában egyre növekvő népszerűségnek örvendő és most már legalább a tervezőasztalon létező kis és közepes méretű kompakt reaktorok (angolul SMR, Small and Medium size Reactors) gondolata még a láthatáron sem volt [4]. Azt javasoltam, hogy az akkor koncepcionálisan nagyon felkapott gyorsítóval hajtott szubkritikus rendszerekkel (ADS, Accelerator Driven System) lenne érdemes megoldani a feladatot, mert ezeknek jó biztonsági tartalékaik vannak, és a mozgatás idejére könnyen leállíthatók. Nukleáris meghajtású hajók, mint például tengeralattjárók, jégtörők vagy repülőgép-anyahajók nem kerülhettek szóba, hiszen a távolság még a legközelebbi parthoz is túl nagy volt.

Ilyen formában a KamLAND detektornál közeli nukleáris reaktorokból származó neutrínókkal való mérések nem valósultak meg. A technikai, biztonsági és költségvetési akadályok túl nagynak bizonyultak egy mozgatható reaktor megépítéséhez. A harmadik típusú oszcillációk megtalálásához nem is a neutrínóforrást vitték közel egy már meglévő detektorhoz, hanem detektorokat telepítettek a már működő, nagyteljesítményű reaktortelepek közelébe. Az első sikeres méréseket Kínában végezték 2012-ben, utána pedig Franciaországban, majd Dél-Koreában. Mindhárom esetben reaktorokban keletkező neutrínókon végezték a méréseket. Az első, döntő méréseket a kínai Daya Bay nevű, 6 reaktoregységet tartalmazó erőműnél végezték, ahol hat különböző antineutrínó-detek-



5. ábra. A szerző Takaaki Kajitával, az egyik 2015-ös fizikai Nobel-díjossal (fotó: Pázsit Mária).

tort telepítettek. Azóta még további két detektort telepítettek, és a kibővített műszerezés és hosszabb adatgyűjtési idő kombinációja eredményeként a mérési eredményeket tovább pontosították [5].

A mérésekben a távolság a detektorok és a reaktorok között 500 és 1500 méter között változott. A mozgatható reaktort, amit A. Suzuki akart használni, nem is kellett volna nagy távolságra mozgatni. Mivel az oszcillációs hossz fordítva arányos a két flavorállapotot meghatározóan alkotó tömeg-sajátállapotok tömegkülönbségével, így ez a mérés azt is bizonyította, hogy az elektron–tau–neutrínók oszcillációjában egymásba alakuló domináns tömegállapotok tömegkülönbsége jóval nagyobb, mint a müon–tau- vagy az elektron–müon-neutrínó-oszcillációkban egymásba alakuló állapotoké.

Talán közbevetőleg érdemes azt is megemlíteni, hogy a neutrínók segítenek feltérképezni a földkéregben az urán és a tórium eloszlását és arányát, valamint azt megállapítani, hogy a Föld hőháztartásában milyen szerepet játszanak a Föld belsejében lezajló radioaktív bomlási folyamatok, ahogy ezt *Patkós András* a *Fizikai Szemle* egy korábbi számában leírta [6]. Mivel a „föld-” vagy „geoneutrínók” és a reaktor-neutrínók energiaspektruma különböző, ilyen mérések korábban is, több helyen végeztek, például az olaszországi Borexino projektben és nem kevésbé a KamLAND-nál is [7]. A fukusimai baleset utáni teljes japán reaktorleállítás lehetőséget ad a KamLAND kísérletben a korábbinál pontosabb geoneutrínó-mérések végzésére [8]. Ezt a helyzetet úgy is jellemezhetjük, hogy az atomreaktorok mind aktívan, mind passzívan, hozzájárulnak a neutrínó kutatásokhoz ☺.

Atsuto Suzukival 2005 óta nem találkoztam, csak egy pár levelet váltottam vele ezen kis írás készítése közben. Viszont 2015. december 8-án meghívást kaptam a stockholmi Japán Követségre, egy fogadásra, amit a két új japán Nobel-díjas tiszteletére adtak. Itt alkalmam volt néhány szót váltani *Takaaki Kajita* professzorral, az egyik 2015-ös fizikai díjazottal (5. ábra), és természetesen a korábbi találkozásom is szóba jött Atsuto Suzukival. Kajita sensei nagy tisztelettel beszélt Suzukiról, mint tanáráról és mentoráról.

Én személy szerint két ok miatt is örültem a japán KamLAND és a kínai Daya Bay mérések sikerének. Egyrészt mivel jómagam is reaktorfizikus lettem; másrészt mivel van némi elméleti/részecskefizikai múltam. Szakdolgozatomat ugyanis az ELTE Elméleti Fizikai Tanszékén, *Montvay Istvánnál* készítettem erős kölcsönhatások területén (a dolgozat címe *SU(6)-szimmetrikus duális rezonanciamodell mezoszórásra* volt). A neutrínók persze gyengén hatnak kölcsön, tehát dolgozatom egy más területen volt. Ennek ellenére, bár ezt a területet rég elhagytam, természetesen örömmel gondolok arra, hogy a mostani működési területem hozzájárulhatott az alaptudományokhoz, és nem utolsósorban annak, hogy a neutrínóoszcillációk kérdése véglegesen eldőlt.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni *Patkós Andrásnak*, hogy felkért a kézirat megírására, valamint hasznos szakmai tanácsait és megjegyzéseit. Köszönöm a szakmai lektor hasznos javaslatait. Köszönet illeti Atsuto Suzuki professzort is a KamLAND-os mérésekről adott információkért, valamint a képanyagért és annak a *Fizikai Szemle*ben történő közléséhez való hozzájárulásáért.

Irodalom

1. Király Péter: Kvantumjelenségek kozmikus méretekben: a 2015. évi fizikai Nobel-díj és háttere. *Fizikai Szemle* 65/12 (2015) 420–424.
2. K. Eguchi és munkatársai, közöttük A. Suzuki (the KamLAND Collaboration): First results from KamLAND: Evidence for reactor antineutrino disappearance. *Phys. Rev. Lett.* 90/2 (2003) 021802.
3. Nakajima, K., Inoue, K., Owada, K., Suekane, F., Suzuki, A., Hirano, G., Kosaka, S., Ohta, T., Tanaka, H.: A simple model of reactor cores for reactor neutrino flux calculations for the KamLAND experiment. *Nucl. Instr. Meth. A* 569/3 (2006) 837–844.
4. Pázsit Imre: Új megoldásokkal a fenntartható atomenergetika felé: harmadik és negyedik generációs, valamint kis és közepes méretű reaktorok. *Magyar Tudomány* 2016/2 212–225.
5. F. P. An és munkatársai (Daya Bay együttműködés): New Measurement of Antineutrino Oscillation with the Full Detector Configuration at Daya Bay. *Phys. Rev. Lett.* 115 (2015) 111802.
6. Patkós András: Földneutrínók. *Fizikai Szemle* 62/5 (2012) 157–159. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1205/PatkosA.pdf> és <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1205/FizSzem-201205.pdf>
7. T. Araki és munkatársai: Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND. *Nature* 436 (2005) 499–503.
8. Alexandra Witze: Detectors zero in on Earth's heat. *Nature* 496 (2013) 17.